

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Matěj Dvořák

Mrazové zvětrávání pískovců: mechanismy a laboratorní experimenty
Frost weathering of sandstones: mechanisms and laboratory experiments

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce:
doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

Praha, 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 30.08.2016

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. RNDr. Jiřímu Bruthansovi, Ph.D. za vedení práce a cenné rady v průběhu jejího vzniku. Také děkuji PhDr. Jiřímu Hromádkovi a Mgr. Evě Hromádkové za pomoc při gramatické kontrole práce.

Bakalářská práce byla finančně podpořena grantem GAČR č. 16-19459S.

Mrazové zvětrávání pískovců: mechanismy a laboratorní experimenty

Abstrakt

Práce se zabývá studiem a srovnáním mechanismů mrazového zvětrávání, dále popsáním těch vlastností horninového materiálu a vnějších okolností, které na průběh zvětrávání mají vliv. Působení účinků mrazu bylo vztaženo na pískovce. Sestává z rešerše literatury a vlastních experimentů.

Z rešerše literatury vyplývá, že mrazové zvětrávání u pískovců je vzhledem k jejich vlastnostem (vyšší porozita, struktura zrn) ovlivněno spíše mechanismy založenými na migraci kapaliny prostorem pórů během mrznutí horniny. Kromě parametrů vlastních jejich materiálu je pak důležitý stupeň saturace vodou, cílová nejnižší teplota mrznutí a rychlost jejího dosažení.

Byly provedeny pokusy na vzorcích křídových pískovců (kvádrový a jílovitý pískovec Českého ráje) a karbonských arkóz syřenovského souvrství. Vzorky byly vystaveny opakovaným cyklům mrznutí při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tání v destilované vodě. Průběh zvětrávání byl sledován měřením úbytku hmotnosti a popisem poškození. Vzorky byly zvětrávány volně položené a pro srovnání byla část vzorků zvětrávána za působení tahového namáhání (3 kPa).

Na základě pokusů byla popsána odolnost jednotlivých vzorků (od nejvyšší: arkóza – kvádrový pískovec – jílovitý pískovec) a rozlišen průběh zvětrávání (jílovitý pískovec – postupná ztráta zrn; kvádrový pískovec a arkóza – rozpad na více částí, kolaps částí struktury). Vzorky testované v tahu vykazovaly přibližně třetinovou trvanlivost oproti odpovídajícím vzorkům testovaným volně a rozpad (ztráta tahového namáhání) nastal již při nízkém hmotnostním úbytku (přibližně 6 %). Výsledky ukazují zásadní vliv i mírného tahového namáhání na odolnost pískovce vůči mrazovému zvětrání.

Frost weathering of sandstones: mechanisms and laboratory experiments

Abstract

This thesis studies and compares different mechanisms of frost weathering, and further describes the characteristics of the rock material and the external environment, which affect this process. The effects of frost action were related to sandstones. The thesis consists of a literature review and practical experiments.

The literature review indicates, that frost weathering of sandstones is due to their characteristics (higher porosity, grain structure) rather influenced by mechanisms based on water migration through the pore space of freezing rock. Beside the properties of the sandstone material, also the water content, the final temperature of freezing and the rate of the temperature fall are important.

The experiments were performed on samples of Cretaceous sandstones (thick-bedded and argillaceous sandstones of Bohemian Paradise) and Carboniferous arkoses of Syřenov formation. Samples were subjected to repeated cycles of freezing at - 20 °C and thawing in distilled water. The weathering progress was monitored by measuring the weight loss and damage description. Selected samples were further compared to samples weathered under the influence of tensile stress (3 kPa).

Based on the experiments, the frost resistance (from the most resistant: arkose – thick-bedded sandstone – argillaceous sandstone) and the process of weathering (argillaceous sandstone – a successive grain loss; thick-bedded sandstone and arkose – breaking into several parts, structure disintegration) of particular samples were described. Samples tested in tensile stress exhibited approximately three times lower frost resistance when compared to corresponding samples tested loosely placed, and break-up (loss of tensile stress) occurred already at low weight loss (c. 6%). The results show a significant impact of even moderate tensile stress on the frost resistance of sandstones.

OBSAH

1 Úvod: Mrazové zvětrávání pískovců	7
2 Mechanismy mrazového zvětrávání	8
2.1 Teplota mrznutí vody v pórech	8
2.2 Objemová expanze ledu a migrace vody v pórech	9
2.3 Mechanismy nárůstu tlaku v pórech	10
2.4 Vedlejší zvětrávací mechanismy	11
3 Parametry určující průběh zvětrávání	12
3.1 Saturace vodou a teplotní dilatace	15
3.2 Působení solí	16
3.3 Změny porozity a struktury pórů během mrazového zvětrání	17
4 Standardní způsoby testování	18
5 Praktická část práce	19
5.1 Charakteristika vzorků	19
5.2 Metodika testování	21
6 Výsledky experimentů	23
6.1 Volně postavené vzorky	23
6.2 Vzorky testované v tahovém namáhání	25
7 Závěr	29
Seznam použité literatury	31
Seznam použitých obrazových materiálů	34
Přílohy	I-VI

Mrazové zvětrávání pískovců: mechanismy a laboratorní experimenty

1 Úvod

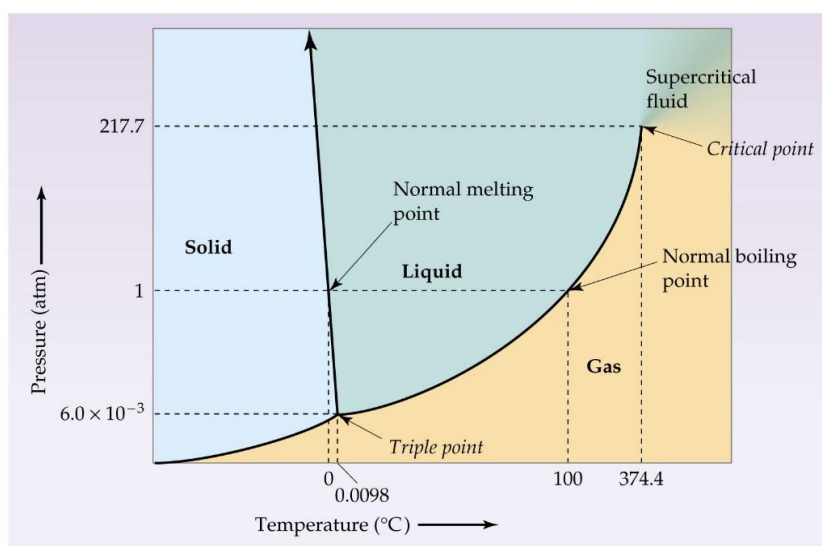
Mrazové zvětrávání je v podmínkách střední Evropy běžný jev, který je odpovědný za velkou část škod způsobených nejen na pískovcích, ale i na jiných materiálech (Ruedrich et al., 2010). Představy o příčinách tohoto jevu se postupem času vyvíjely od těch nejjednodušších, kdy voda zateklá do prasklin v materiálu zvětšením svého objemu s každým dalším zmrznutím prasklinu zvětšuje a zvětšuje, přes složitější mechanismy vzniklé na základě experimentálních pokusů, porovnávající účinky mrazu na různých horninách za různých podmínek, až po složité modely zahrnující velikosti pórů a rychlosti změn teploty (Walder a Hallet, 1985). Mnoho jich vzniklo na základě posuzování účinků mrazu na dekorační kameny, mezi které se zde zejména v minulosti pískovcové horniny řadily pro svou dostatečně vysokou mechanickou odolnost a přitom dobrou opracovatelnost. Ta u nich ale (podobně jako u dalších sedimentárních hornin) naznačuje větší náchylnost ke zvětrávání (Nicholson a Nicholson, 2000).

Cílem první části této práce je zpracovat rešerši o mechanismech mrazového zvětrávání pískovců a souhrnu faktorů, které je ovlivňují. Cílem následující praktické části je otestovat odolnost vůči mrazovému zvětrávání u vybraných litologií pískovcových hornin a u některých z nich porovnat průběh zvětrávání u volně položených vzorků se vzorky stejné horniny vystavenými tahovému namáhání. Pokusy spočívaly v opakovaných cyklech mrznutí a tání.

2 Mechanismy mrazového zvětrávání

2.1 Teplota mrznutí vody v pórech

Procesy krystalizace ledu se dají rozdělit na mechanismy nukleace krystalů a na mechanismy jejich růstu. Za normálních atmosférických podmínek mrzne čistá voda při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, v horninovém prostředí mrzne obvykle za nižších teplot (Ruedrich et al., 2010). Hall (1988) vložil teploty, za kterých dochází k roztání ledu (v břidlicích), do rozmezí $-0,7$ až $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále je podle něj při teplotě $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ zmrzlých přibližně 80 % vody přítomné v hornině. Nižší teplota mrznutí pórové vody má obvykle dvě příčiny. První je podchlazení, způsobené nedostatkem nukleačních jader pro krystalizaci ledu. V pórovém prostředí hornin se projevuje jen nepatrně, nukleačních jader je obvykle dostatek. Druhou příčinou je snížení bodu mrznutí vody, za kterým může stát změna rovnováhy roztoku, daná přítomností rozpuštěných solí, či snížení účinkem povrchového napětí způsobeného kapilárními silami v pórech. Ty jsou tím větší, čím menší jsou rozměry pórů, proto voda v menších pórech mrzne za nižších teplot. V závislosti na distribuci velikostí pórů, jejich tvarech a vzájemném propojení pak může být voda ve větších pórech zmrzlá, zatímco v menších je stále v kapalném stavu (Ruedrich a Siegesmund, 2006). Při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ by měla být zmrzlá ve všech pórech větších než $0,006\text{ }\mu\text{m}$ (Ruedrich et al., 2010).



Obr. 1: Fázový diagram čisté vody.

Zdroj: http://www.dmc.fmph.uniba.sk/public_html/pub/lectures/ex.htm

2.2 Objemová expanze ledu a migrace vody v pórech

Základním předpokladem pro vznik poškození horniny mrazem je, že napětí vyvolané krystalizací ledu překročí mez pevnosti horniny (Winkler, 1968). Nejjednodušším zvažovaným mechanismem vyvolání tohoto napětí je objemová expanze během fázové přeměny vody na led (Hirschwald, 1908), podle Everetta (1961) mechanismem mnoha autory dlouho považovaným za hlavní příčinu mrazového zvětrávání. Objemový nárůst vody po zmrznutí je 9 %, horniny schopné samovolně dosáhnout saturace přes 90 % objemu pórů by tak byly extrémně zranitelné (Hirschwald, 1908). Horniny v přírodě však takové míry saturace obvykle nedosahují. Přesto jsou některé horniny účinky mrazu ovlivněny i při nižší míře saturace než 90 %.

V uzavřených puklinách (saturované, bez redistribuce vody, nízká propustnost) je objemová expanze při přeměně vody na led za hlavní příčinu mrazového zvětrávání hornin stále považována (Walder a Hallet, 1986). Takových případů ale může být obtížné dosáhnout vzhledem k protichůdným nárokům na možnost pohybu kapaliny. Nejspíš by tomu mohl napomáhat velmi prudký pokles teploty (Walder a Hallet, 1985).

Walder a Hallet (1986) zdůrazňují, že příčinou poškození horniny mrazem není objemová změna při fázové přeměně kapalné vody na led, ale spíše migrace vody k mrznoucí frontě. Tento jev byl popsán na případech mrznoucích půd a později demonstrován a ověřen i u pevných hornin. To, že voda proudí směrem k centřům mrznutí a není vypuzována směrem opačným, je určeno nikoliv objemovou expanzí ledu, ale působením gradientu chemického potenciálu. Zásadním důsledkem tohoto mechanismu je to, že při dostatku vody mohou být působící síly podstatně vyšší než v případě působení samotné objemové expanze vody původně přítomné v pórech (Taber 1930).

Pokud by hlavním mechanismem mrazového zvětrávání byla objemová expanze ledu v puklinách a za předpokladu, že veškerá v pórech přítomná voda nezmrzne naráz a na místě, kapalná voda by byla postupující mrznoucí frontou spíše vytlačována (v závislosti na propustnosti horniny). V uzavřeném systému může při dostatečné míře saturace narůstající tlak takto vytlačované vody vést k hydrofrakturaci (hydraulickému štěpení) horniny (Hallet, 1983). To je pravděpodobné při rychlém mrznutí, omezené propustnosti, v situacích, kdy se samotné pomalé zvětšování puklin nedokáže přizpůsobit rychle narůstajícímu tlaku. Příkladem je mrznoucí volný blok horniny, kde mrznoucí fronta postupuje od okrajů směrem dovnitř a vypuzovaná voda nemá kam

unikat. Podobné projevy mohou nastat v případě rychlého promrzání méně odolných hornin z jedné strany (Matsuoka a Murton, 2008).

Sklon nezamrzlé vody migrovat k mrznoucím centrům v horninách se projevuje v otevřených systémech, nahrává tomu pomalé mrznutí kapaliny (Walder a Hallet, 1985). V mrznoucích půdách mohou tlaky spojené s migrací vody k čočkám ledu překročit 20 MPa, odpovídající tlaky by v měřítku malých puklin byly dostatečné ke způsobení růstu puklin ve většině hornin zemského povrchu (Radd a Oertle, 1973; Takashi, 1980). V částečně saturovaných systémech má voda tendenci mrznout ve volných větších pórech, kde nezpůsobuje vznik poškození. Přesto ale nízká míra saturace migraci kapaliny a postupný nárůst tlaků nevylučuje (Walder a Hallet, 1986).

2.3 Mechanismy nárůstu tlaku v pórech

Scherer (1999) popsal model (tzv. model lineárního nárůstu tlaku), ve kterém je vznik a růst trhlin iniciován postupným nárůstem tlaku působeného rostoucími krystaly ledu (či solí) a transportem iontů na místa krystalizace. Pro transport iontů je nezbytná tenká vrstva vody mezi vznikajícím ledem a přemísťovanými ionty, pro růst krystalů ledu je třeba podchlazení kapaliny nebo v případě krystalizace solí přesycení jejich roztoků. Působení sil ve větších pórech je nižší než v pórech menších. Poškození není dáno krystalizací uvnitř jednoho póru, síla musí být dostatečná k proniknutí menšími póry, rostoucí krystaly musí působit na dostatečné ploše pro zvětšení puklin limitujících pevnost horniny.

Steiger (2005) rozvíjí předchozí model, zabývá se spíše roztoky solí. Popisuje působení narůstajícího krystalizačního tlaku v uzavřenějších pórech s omezenou možností komunikace s okolním prostředím (malými „vstupy“ póru) za přítomnosti přesycených roztoků. Do určité velikosti krystalů pak podle něj platí, že u stejně nasycených roztoků způsobují větší krystaly vyšší tlak. Krystalizační tlak může vznikat rovněž u otevřených pórů, nicméně potom nepůsobí rovnoměrně a stále, ale jen v dočasných vlnách ovlivněných více vnějšími faktory (nárůst tlaku již není lineární).

Everett (1961) navrhl tzv. model kapilárního tlaku – krystalizace ledu v nasycené hornině začíná nejdříve ve větších pórech, v menších je teplota mrznutí kapaliny díky působícím kapilárním silám nižší. Krystaly ledu větší póry vyplní tak, že mezi jimi a povrchem horniny zůstane jen velmi tenká vrstva kapaliny, která může sloužit jako transportní médium pro migrující rozpuštěné látky. Zaplnění velkých pórů znamená, že

led může dále krystalizovat pouze v sousedících pórech menších, pro to je ale potřeba vyšší míry podchlazení nebo nasycení roztoku. Ve chvíli, kdy je takové rovnováhy dosaženo a krystalizace pokračuje, je roztok ve vztahu ke krystalizaci ledu ve větších pórech více podchlazený či nasycený, než pokud jde o krystalizaci v pórech menších, a proto se snaží přednostně krystalizovat tam. Tím roste tlak působený na povrch větších pórů.

Poškození horniny je tak způsobené růstem krystalů ve větších pórech, které však potřebují zdroj vody z nezamrzlých pórů menších a případně z částí horniny neovlivněných mrznutím. Pohyb kapaliny je zde způsoben mj. napětím tvořeným kapilárními tlaky. Pozitivní vliv přesycení roztoku na vznik vyšších tlaků je daný sníženou teplotou mrznutí kapaliny v pórech, které je proto schopno migrovat a být k dispozici pro nárůst krystalů větší množství (Everet 1961).

2.4 Vedlejší zvětrávací mechanismy

Mechanismus zvětrávání se u stejného vzorku liší při rozdílných cílových teplotách, rychlostech poklesu teploty, vlastnostech pórového prostoru, obsahu a distribuci pórové vody a také na koncentracích solí ve vodě (Hall, 1988). Různé procesy poškozování horniny mohou v závislosti na těchto faktorech účinkovat zároveň nebo časově posunutě (Stockhausen, 1981). V případech, kdy je zásadním faktorem pro růst trhlin migrace vody a nárůst krystalů v pórech, není bezpodmínečně nutné časté střídání cyklů mrznutí a tání. To dokonce může bránit dosažení dostatečného tlaku. Růstu puklin naopak napomáhají delší periody mrznutí s dostatkem vody a pomalé ochlazování. Pro střídání cyklů mrznutí a tání nejsou potřeba kladné teploty vzhledem k tomu, že voda v horninách mrzne a taje za teplot nižších než 0 °C (Walder a Hallet, 1985).

Na základě pozorování rychlosti šíření ultrazvukových vln horninovým materiálem a za předpokladu, že se přeměna vody na led projeví nárůstem rychlosti jejich šíření, rozpoznal Hall (1988) tři hlavní typy fázového přechodu. Prvním způsobem je rychlé, poměrně náhlé a rozsáhlé mrznutí vody, jehož předpokladem je předchozí značné podchlazení kapaliny v pórech. Tento typ byl pozorován při nízké rychlosti poklesu teploty a nízkých cílových teplotách. Ke krystalizaci dochází při dosažení přílišné míry podchlazení (nebo příp. vnějším impulzu), kdy již voda za daných podmínek nemůže zůstat v kapalném stavu a proto mrzne téměř naráz. Druhý typ přeměny představuje relativně pomalé a postupné mrznutí vody, které se projevuje rovněž při nízkých

cílových teplotách, ale při rychlejším poklesu teploty horniny, který neumožní vznik podchlazení. Voda tak mrzne nejdříve ve větších pórech či prasklinách a s dalším snižováním teploty mrzne i v pórech menších. Poslední typ mrznutí se projevuje v podmínkách vyšší koncentrace solí v pórové vodě. Přeměna kapaliny na led je v takových podmínkách sice postupná, ale relativně rychlá, oběma parametry se pohybuje mezi předchozími dvěma případy. Přechod probíhá beze známek podchlazení kapaliny a bez projevů exotermie (uvolněného skupenského tepla mrznutí). Typ přítomné fázové přeměny může být ovlivněn také mírou nasycení horniny.

Hodder (1976) předpokládá, že pokud by při mrznutí byla možná homogenní nukleace jader (to znamená, že krystaly by ledu v mrznoucí hornině vznikly ve stejný okamžik), produkovala by zvukovou šokovou vlnu. Ta by mohla být příčinou určitého poškození horninového materiálu, ovšem pravděpodobně jen v extrémně nízké míře.

3 Parametry určující průběh zvětrávání

Jak již naznačuje předchozí text, to, jaký mechanismus mrazového zvětrávání bude v konkrétním případě účinkovat či bude-li ke zvětrávání opravdu docházet, je ovlivněno kombinací mnoha faktorů. Například Saad et al. (2000) je rozděluje na parametry stavové a přenosové. Mezi stavové parametry řadí charakter pórového prostoru, mechanické vlastnosti horniny a její mineralogii, přenosovými označuje parametry ovlivňující pohyb kapaliny, především kapilaritu a propustnost. Některé parametry jsou do jisté míry závislé na vnitřní stavbě horniny, jiné na jejím vývoji v průběhu času, další na vnějším prostředí, ve kterém ke zvětrávání dochází.

Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti hornin jako pevnost v tlaku nebo pevnost v tahu mohou napovědět, jakou odolnost mrazovému zvětrávání lze očekávat, nicméně pro její určení nestačí a je třeba vzít v úvahu podrobnější charakteristiku struktury a ostatních vlastností materiálu jako je velikost zrn a vytrídění a mineralogické vlastnosti a cementace (Nicholson a Nicholson, 2000). Dobře vytríděné a spíše hrubozrnné pískovce snáze odolávají zvětrávání než pískovce jemnozrnné či hůře vytríděné. Velikost zrn může být jeden z hlavních faktorů ovlivňujících způsob zvětrávání

horniny, tedy zda půjde o postupný úbytek zrn z povrchu horniny nebo o tvorbu delších puklin (Nicholson a Nicholson, 2000). Svou roli má také zastoupení jílových minerálů či karbonátů v cementu horniny, přítomnost živců důležitou roli nehraje. Jíly reagují na zvýšení obsahu vody jinak než křemen a jejich zrna se vzhledem k velikosti snadněji redistribuují nebo vyplavují. Karbonátový tmel se může rozpouštět (Labus a Bochen, 2012). V mnoha případech jsou účinkem mrazu aktivovány hlavní horninové diskontinuity, například již existující pukliny nebo sedimentární zvrstvení horniny (Nicholson a Nicholson, 2000). Jindy se může hornina zdát mrazem makroskopicky neporušená, ale její struktura je poškozena natolik, že k jejímu rozkladu stačí působení nepatrného vnějšího vlivu.

Hydraulické vlastnosti

Vliv na průběh a míru mrazového zvětrávání má hodnota celkové efektivní pórovitosti, distribuce velikostí pórů a také tvar jejich kontaktů (Labus a Bochen, 2012), zejména vzhledem k úzké souvislosti jejich charakteru s dalšími zásadními vlastnostmi horniny. Efektivní porozita určuje možnou míru saturace horniny vlhkostí, distribuce a velikost pórů ovlivňuje propustnost materiálu a průběh mrznutí vody. Tvar kontaktů má spolu s velikostí pórů vliv na kapilaritu a účinky působení sil krystalů ledu.

Pevnost pískovců se významně snižuje s nárůstem vlhkosti v pórech, obvykle již od nízkých hodnot. Při mrazovém zvětrávání je také významná distribuce vody ve vzorku, na kontaktech saturovaných a suchých zón hornin vzniká pnutí, které napomáhá poškozování horniny. Dostatek vody napomáhá vzniku poškození hornin při pomalém ochlazování a mrznutí (Walder a Hallet, 1985).

Ideální podmínky pro zvětrávání tvoří přítomnost větších a menších pórů ve vzájemném kontaktu (Fitzner a Snethlage, 1982). Makropóry (10 – 100 μm), kterými dobře proudí kapalina, umožňují snadné nasycení materiálu vodou. Samy o sobě ale vodu také snadno uvolňují. V přírodě je tak v horninách s převládajícími makropóry interakce horniny s vodou omezena na vlhká nebo deštivá období. Volný tok kapaliny navíc snižuje pravděpodobnost krystalizace solí v pórech. Pískovce s dobře vytříbeným materiálem, jednotnou distribucí větších pórů a vhodnými (konkávně-konvexními) kontakty zrn proto vykazují vysokou odolnost vůči zvětrávacím procesům. Submakropóry (0,1 – 1 μm), které poté vodu zadržují uvnitř horniny, tvoří zdroj vody pro migraci k rostoucím krystalům ledu během mrznutí, samy o sobě pak zvyšují

pravděpodobnost krystalizace solí ve struktuře horniny. V mikropórech je však možnost mrazového zvětrávání do určité míry omezena nižší propustností materiálu pro vodu. U hornin s nízkou propustností materiálu roste vliv puklin, kterými může proudit voda (Nicholson a Nicholson, 2000).

Vlastnosti prostředí

Vnější prostředí může mrazové zvětrávání ovlivnit zejména dvěma faktory, teplotou a přítomností solí v pórové vodě. Mrazové zvětrávání účinkem roztoků solí působí v porovnání s čistou vodou větší škody (např. Hall, 1988), jejich účinky budou rozvedeny v samostatné části. Pokud jde o teplotu, lze rozlišit rychlost poklesu teploty prostředí, rychlost poklesu teploty horniny a cílovou nejnižší teplotu (amplitudu mrazu). Rychlost poklesu teploty materiálu je považována za jeden z hlavních určujících činitelů způsobu a míry mrazového zvětrávání konkrétní horniny (Hall, 1988). Pro stejnou cílovou teplotu nebo dobu vystavení mrazu je způsobené poškození tím větší, čím pomalejší je pokles teploty a čím nižší je rychlost mrznutí horniny. Rychlost mrznutí horniny je ale v běžných přírodních podmínkách daná spíše výslednou teplotou prostředí než rychlostí, kterou je jí dosaženo, protože hornina promrzá několikanásobně pomaleji, než se ochlazuje okolní prostředí (Walder a Hallet, 1985).

V hydraulicky otevřených systémech, kde se na vzniku poškození podílí migrace vody k mrznoucím jádrům a nikoli vznik vysokého tlaku vody v pórech nezmrzlých částí horniny, je růst puklin nejintenzivnější pro rychlost ochlazování přibližně 0,1 až 0,5 °C/h (Walder a Hallet, 1985). Účinky extrémně nízkého poklesu teplot (méně než 0,1 °C/h) se liší podle vlastností konkrétních hornin, nárůst poškození se při nich obvykle neprojevuje.

Rychlost vzniku puklin je velmi nízká pro teploty mírně pod 0 °C, tedy hodnoty blízké teplotě mrznutí vody v pórech, při kterých jsou vznikající síly omezeny termodynamicky. Okraje mrznoucí fronty jsou sice dostatečně propustné pro přísun dostatku vody a maximálního tlaku vyvinutého rostoucími krystaly je dosaženo během relativně krátkého času (desítky hodin), ale tento tlak je nízký a k šíření vznikajícího poškození dochází jen velmi pomalu nebo vůbec. Pro nízké teploty (méně než přibližně -20 °C) je značně omezen pohyb vody vzhledem k intenzivnějšímu mrznutí a nízké hydraulické vodivosti okrajů mrznoucí zóny. Maximální dosahovaný tlak je vysoký, ale k jeho dosažení je potřeba velmi dlouhého času.

Vznik a růst puklin je nejvíce efektivní při středně nízkých teplotách. V závislosti na počáteční velikosti pórů a již přítomných poškození je to v rozmezí přibližně - 4 až - 15 °C. Okraj mrznoucí zóny je relativně dobře propustný pro dostatečné množství vody, vznikající tlak je dostatečný k překonání pevnosti horniny a růstu puklin a zároveň je ho dosaženo poměrně rychle (desítky až první stovky hodin) (Walder a Hallet, 1985). V určitých hloubkách uvnitř hornin může být rychlost poklesu teplot vhodně nízká pro vznik vysokých tlaků ledu, ale zároveň je přítomno málo vody (Hall, 1988) nebo hornina v dané hloubce ani nestihne zamrznout, a proto podmínky nasvědčující mrazovému zvětrávání nenastávají. Poškození se proto často projevuje jen v okrajových částech hornin.

3.1 Saturace vodou a teplotní dilatace

Stupeň saturace hornin významně ovlivňuje míru zvětrávání (Hallet, 1983; Hall, 1988), u pískovců již od nízkého množství vody v pórech. U mrazového zvětrávání jsou důležité spíše vyšší hodnoty saturace, při nízké saturaci je v pórech obvykle dostatek prostoru pro redistribuci vody během mrznutí, což vede ke snížení maximálních vznikajících tlaků. Rozdílné je chování vzorků saturovaných kapilárně a vakuově (Ruedrich a Siegesmund, 2006). Kapilárně saturované vzorky pískovců obvykle dosahují hodnot saturace okolo 75 % dostupné porozity, ve zbytku pórového prostoru zůstává vzduch (Williams a Robinson, 1981).

Kapilárně saturované horniny mohou za určitých okolností snášet zvětrávání relativně dobře, vakuově saturované vzorky obvykle podléhají velmi rychlému rozpadu. To je způsobeno malým objemem zbylých volných pórů; migrace, nárůst tlaku vody a růst krystalů pak snáze působí přímo na horninovou strukturu (Ruedrich a Siegesmund, 2006). Platí i pro procentuálně stejně saturované horniny vakuově jako kapilárně. Některé pískovce mohou dosáhnout vysokého stupně saturace za velmi krátkou dobu, např. Ardingly Sandstone s porozitou okolo 25 % dosáhne za běžných podmínek 95% saturace již během prvních pěti minut po ponoření do vody (Williams a Robinson, 1981).

Při nerovnoměrné distribuci vody v pórovém prostoru reagují různě nasycené části horniny na působení mrazu odlišně. Předpokládá se možný vznik napětí mezi saturovanějšími a méně saturovanými či suchými místy horninového materiálu, které

může napomáhat jeho oslabování a v delším časovém měřítku může vést i k rozpadu hornin (Ruedrich a Siegesmund, 2006).

Změny teplot jsou na horninách pozorovatelné i jako změny jejich délky. Pokud hornina neobsahuje vlhkost, je možné pozorovat víceméně lineární chování vzorků hornin v běžném rozmezí teplot, při ochlazování k $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ probíhá kontrakce a při následném zpětném ohřátí na kladné teploty se horniny vrací k původní délce. Nezůstává patrné žádné zbytkové napětí, které by při opakovaných cyklech vedlo k růstu puklin a rozkladu materiálu (Ruedrich et al., 2010).

Při ochlazování vzorků s obsahem vody je již od nízkých hodnot saturace patrný její vliv na změny délky. Postupné zkracování materiálu je po počátku mrznutí vody v pórovém prostoru následováno mírným roztažením způsobeným mechanickým působením krystalizujícího ledu. Po něm obvykle hornina pokračuje v kontrakci. Při zvyšujícím se obsahu vody je působení ledu výraznější. Po dosažení určitého stupně saturace (např. 70 % pro Ruethen sandstone – Ruedrich a Siegesmund, 2006) se průběh změny délky po započetí mrznutí může měnit v závislosti na ledem způsobených změnách struktury horniny. Rozdílně se opět projevují vzorky nasycené kapilárně oproti vzorkům saturovaným vakuově.

V horninách obsahujících vodu se projevuje hystereze. Velikost hystereze a teplota, při které se během krystalizace ledu projeví dilatace materiálu, je závislá na rychlosti poklesu teploty, při rychlejším ochlazování horniny hystereze roste a teplota, při které se projeví dilatace, klesá (Ruedrich a Siegesmund, 2006). Rozdílné chování v závislosti na míře saturace materiálu je pravděpodobně způsobeno tím, že led má oproti křemenu, ze kterého pískovec především sestává, mnohonásobně větší součinitel teplotní roztažnosti. Vliv má také distribuce vody mezi různě velké póry (La Plaza a Post, 1960).

3.2 Působení solí

Přítomnost solí v roztoku může významně zvýšit účinky mrazového zvětrávání hornin. Williams a Robinson (1981) provedli pokusy spočívající v pozorování vzorků namáčených v saturovaných roztocích chloridu sodného, síranu sodného a deionizované vodě vystavené mrazovému zvětrávání – opakovaným cyklům mrznutí a tání, a jejich porovnání se vzorky vystavenými pouze namáčení a sušení ve stejných roztocích.

Bez působení mrazu byly u vzorků v deionizované vodě v průběhu dvaceti cyklů popsány pouze minimální škody v řádu desetin procenta původní hmotnosti, u vzorků v chloridu sodném dokonce nevzniklo žádné rozpoznatelné poškození a vzorky přibýly na váze. Roztok síranu sodného naopak vzorky zvětrával velmi intenzivně, po dvaceti cyklech zbyla pouze pětina jejich původní hmotnosti. Z toho vyplývá, že ne všechny soli působí rozkladně samy o sobě (některé však ano). Při pokusech s čistou vodou může na začátku pokusů vzniknout rozpuštěním solí dříve vysrážených v pórech roztok o koncentraci až 0,5M NaCl (Hall et al., 1986).

Při opakování cyklů mrznutí a tání se poškození deionizovanou vodou zvedlo jen nepatrně, zatímco u obou nasycených roztoků došlo během dvaceti cyklů k úplnému nebo téměř úplnému zničení vzorků. Roztoky solí snižují teplotu mrznutí kapaliny v prostředí horniny, což může během mrznutí dovolit vyvinutí větších krystalů ledu i solí uvnitř pórů, než jaké by vznikly za vyšších teplot. Při ochlazování nasycených roztoků se srážejí krystaly čisté soli, což roztok oslabuje. Tím vznikají i krystaly ledu. Po dosažení určité teploty mrzne kapalina úplně.

Teplota pro mrznutí nasyceného roztoku chloridu sodného je nižší než pro roztok síranu, pravděpodobně proto je chloridem podporované mrazové zvětrávání výraznější. Schopnost pískovců odolávat zvětrávání mrazem za přítomnosti solí je odlišná od jejich odolnosti zvětrávání účinky samotných solí. Přítomnost solí v roztocích v oblastech častého mrazového zvětrávání je obvyklá (Williams a Robinson, 1988).

3.3 Změny porozity a struktury pórů během mrazového zvětrání

V závislosti na kapilárních vlastnostech pórového prostředí dochází v běžných podmínkách ke střídání namáčení, vysoušení, transportu vody a roztoků solí a k jejich mrznutí. Tyto procesy mohou způsobovat změny distribuce velikosti pórů, jejich prostupnosti pro kapaliny i změny celkové porozity (Labus a Bochen, 2012). Zvyšování celkového objemu velkých pórů napomáhá účinkům mrazového zvětrávání, protože rostoucí krystaly ledu jsou v nich schopny vyvinout vyšší tlak působící na strukturu materiálu. Hornina s vyšším zastoupením malých pórů naopak snese nižší kompresní síly než hornina s póry většími (Winkler, 1975). Migrace rozpouštěných solí k povrchu horniny může způsobit dočasné snížení porozity při vysrážení v její vnější části, jejich následné další rozpouštění a pohyb pryč ji však ve výsledku zvyšují. To spolu s prostorem uvolněným vyplavenými jemnými částicemi poskytuje další prostor, ve

kterém může působit mrazové zvětrávání (Labus a Bochen, 2012). Deformace pískovců může jevit anizotropní charakter v závislosti na sedimentárních strukturách a možné planární nebo směrové orientaci částic horniny (Jia et al., 2015).

Labus a Bochen (2012) navrhuje součinnost několika možných procesů, které popisují průběh změn pórového prostoru při mrazovém zvětrávání. Mezi ně patří růst krystalů ledu a působení tlaku kapalin během opakovaných cyklů mrznutí a tání zvětšuje existující trhliny a vznikají pukliny nové. Následně se redistribucí uvolněných jemných zrn zvětšuje velikost pórů. Tím se zlepšuje propojení pórů při zachování velikosti celkové porozity. Dále dochází k rozpouštění, což v případě pískovců ovlivňuje zejména horniny s karbonátovým tmelem. Rozpouštění může vést k otevření do té doby izolovaných pórů, čímž se zvětší prostor pro působení zvětrávacích procesů (Colón, 2004). Posledním procesem je komprese pórů, ke které dochází při přílišném oslabení struktury nebo nárůstu působících vnějších sil.

4 Standardní způsoby testování

U dekoračního kamene (pískovce i jiných hornin) se odolnost vůči mrazovému zvětrávání obvykle zkouší standardizovanými testy. Ty jsou tvořené opakujícími se cykly mrznutí a tání, po kterých jsou změny vzorků kontrolovány měřením úbytku hmotnosti a popisem vzniklého makroskopického poškození materiálu. Testy obvykle zahrnují 30 až 50 cyklů (Ruedrich et al., 2010). Popis změny hmotnosti během testování odolnosti vůči zvětrávání mrazem není pro charakteristiku skutečného poškození materiálu dostatečný, poškození struktury se u odolnějších hornin nemusí projevit makroskopicky. V některých částech Evropy může každoročně docházet k několika desítkám cyklů mrznutí a tání, rozsah proto nemusí dostačovat také.

Pro analyzování míry vnitřního poškození materiálu je vhodné použít měření rychlosti šíření kompresních vln. Již po několika desítkách cyklů mrznutí a tání je s jeho využitím možné i u odolnějších hornin určit, s jakou tendencí se bude poškození vyvíjet, zda povede k celkovému zvětrání horniny, nebo pouze k omezení jejích elastických vlastností. Rovněž měření změn Youngova modulu pružnosti přináší podobné informace o změnách vnitřní struktury, o kterých viditelné vnější poškození a úbytek hmotnosti nemusí vypovídat (Ruedrich et al., 2010).

V průběhu standardních testů odolnosti vůči mrazovému zvětrávání působí na zkoumané horniny i jiné faktory, jako jsou změny vlhkosti nebo teplotní roztažnost. Tyto faktory mohou testování ovlivňovat a u některých hornin představovat i účinnější mechanismus poškozování materiálu, než je samotný mráz. Dále je důležité zmínit, že testování a různé simulace obvykle zkoumají volné bloky hornin nebo opracované vzorky a nejsou aplikovatelné na podloží nebo masivy (Hall, 1988).

5 Praktická část práce

5.1 Charakteristika vzorků

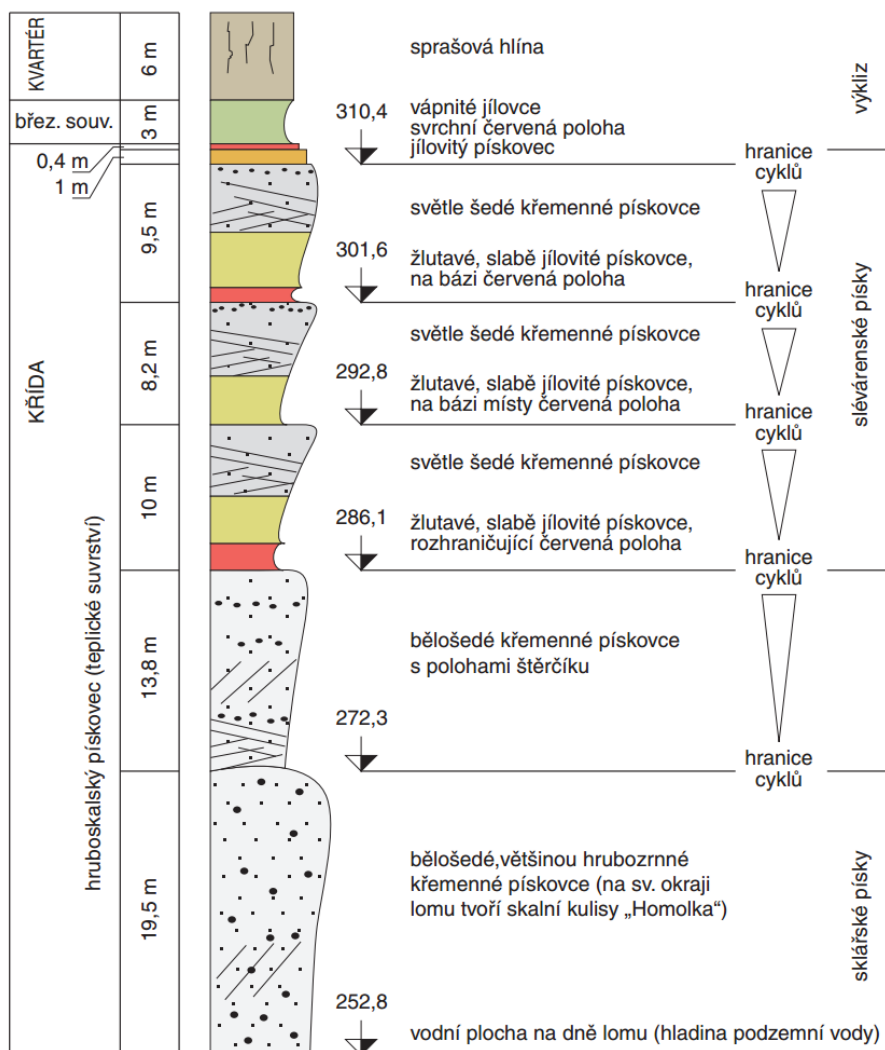
Pro testy mrazovým zvětráním byly vybrány tři druhy pískovce: 1) křemenný kvádrový pískovec z České křídové pánve označený dále A; 2) pískovec s obsahem oxidů železa a jílu z České křídové pánve označený dále B; 3) arkóza ze syřenovského souvrství označená dále S.



Obrázek 2: Fotografie vzorků, zleva: kvádrový pískovec (A), jílovitý pískovec (B), karbonská arkóza (S).

Vzorky A pochází z bloku křemenného kvádrového pískovce z těsného okolí hradu Valdštejna v Českém ráji. Blok byl odebrán školitelem ze sesuvu skalní věže v zatáčce cesty 200 m jižně od hradu v únoru 2013, tedy krátce po zřícení věže. Materiálem odpovídá tzv. slévárenskému pískovci z lomu Střeleč (Geologická mapa 1:25 000, © 2014 ČGS), jedná se o typický kvádrový pískovec tvořící skalní města Českého ráje. Slévárenské pískovce (resp. zkoumané vzorky z Valdštejna) tvoří čistý křemenný pískovec s převážně kaolinickým a částečně také křemenným tmelem.

Hornina je jemně až středně zrnitá, místy zasahují hrubozrnnější polohy. Obsah nekřemenných součástí je velmi nízký, kromě kaolinu se mohou vyskytovat oxidy a hydratované oxidy železa (Bruthans et al., 2012). Místy může být patrné šikmé zvrstvení sedimentu.



Obrázek 3: Schematický litologický profil jámovým lomem Střeleč. Zdroj: Čech a Smutek, 2013

Vzorky B pochází z lomu Střeleč u obce Hrdoňovice v Českém ráji. Jeho odkrytá část představuje asi 80 m vysoký profil, kde se pod skrývkou tvořenou sprašovou půdou a vápnitými jílovci nachází křídové pískovcové těleso teplického souvrství (Bruthans et al., 2012). Vrchních přibližně 40 m tvoří tři deltovitá tělesa mělkovodního mořského vývoje České křídové pánve (Uličný, 2001). Ta jsou tvořena nažloutlými tzv. slévárenskými pískovci. Pro tyto vrstvy je charakteristické postupné hrubnutí materiálů od báze směrem k nadloží a místy jsou odděleny tzv. červenými polohami (svrchní,

střední, rozhraničující). Uspořádání a průběh těchto cyklů jsou dobře sledovatelné až na Hruboskalsko (Čech a Smutek, 2013), což umožňuje srovnání se zkoumaným pískovcem z valdštejnského sesuvu. Pod nimi pokračuje vrstevní sled bělošedými pískovci, podle tradičního technologického dělení suroviny lomu Střeleč nazývanými pískovce sklářské.

Vzorky B byly odebrány z bloku rezavě červeného pískovce z těžené stěny v lomu Střeleč. Jedná se o železitý pískovec z tzv. červené rozhraničující polohy. Materiál má narozdíl od předchozího pískovce větší zastoupení jemnozrnných součástí jílovitého a prachovitého charakteru a také oxidů a hydroxidů železa. Ty způsobují červené zbarvení horniny a spolu s tektonickými poruchami negativně ovlivňují její kvalitu. Vznik železitých krust a minerálů pravděpodobně souvisí s terciérním bazickým magmatismem vázaným na Skaříšovské a Hrdoňovické poruchy (Čech a Smutek, 2013). Červené polohy tvoří litologická rozhraní, která od sebe oddělují sedimentační cykly slévarenských pískovců a tvoří jejich jemnozrnnou bázi. Zatímco v lomu jsou tyto stratigraficky významné polohy názorně odkryty, v přirozených výchozech jsou většinou zakryty sutí.

Vzorky S byly odebrané z bloku situovaného pod převisem Sýkornického (nebo také Novopackého) vodopádu v okolí městečka Pecka. Jde o světlé, hnědě zbarvené masivnější středně až hrubozrnné arkózy nebo arkózové pískovce s občasným výskytem větších valounů. Blok byl součástí sedimentárního profilu karbonského stáří sedimentujícího na deltové plošině (Pešek et al., 2001), ve kterém se střídají odolnější polohy arkóz syřenovského souvrství s vložkami slepenců a méně odolné jemnozrnnější sedimenty. Vzorky jsou rozlišeny Sa a Sb podle zóny bloku, ze které byly odebrány, protože panovala nejistota ohledně litologické homogenity bloku.

5.2 Metodika testování

Průběh testování spočíval v opakování cyklů střídajících mrznutí vzorků v mrazničce při teplotě - 20 °C a rozmrazání v destilované vodě v běžných laboratorních podmínkách. Doby mrznutí trvaly obvykle 2–3 dny, rozmrazání probíhalo po dobu 4–8 hodin.

Testovány byly vzorky pískovců ve tvaru válce o průměru 3 cm a výšce přibližně 4 až 4,5 cm odvrtné z odebraných bloků pískovce v terénu pomocí akumulátorové vrtačky s diamantovým vrtákem. Po připravení a opracování do válcovitého tvaru pomocí rašple byly vzorky sušeny při teplotě 105 °C v sušárně. Poté byla zjištěna jejich

suchá hmotnost a spočítán objem a přibližná hustota horniny. Následovalo ponoření do destilované vody na jednu hodinu, opětovné zvážení a poté již samotné testování odolnosti vůči mrazovému zvětrávání. Po prvním cyklu rozmrazání byla na kontrolním vzorku laserovým teploměrem změřena teplota jádra. Ta po čtyřech hodinách ve vodě odpovídala teplotě vody, ve které byly vzorky ponořené, čtyři hodiny tedy byly dostatečně dlouhý čas pro úplné rozmrznutí vzorku. Po skončení každého cyklu rozmrazání ve vodě byly vzorky zváženy a zdokumentovány.

Od každého pískovce byly testovány tři vzorky volně položené na podložce. Vzorky vybraných pískovců A a B byly kromě toho testovány také v tahu, opět tři od každé horniny. V jejich případě byl po usušení a začištění vzorků na horní i spodní základnu každého válce epoxidovou pryskyřicí přichycen hliníkový T-profil. Za vrchní byl vzorek v průběhu celého testování, tzn. mrznutí, rozmrazání ve vodě i vážení a fotografování, pověšen, na spodní bylo přichyceno olověné závaží o hmotnosti 200 gramů, tedy přibližně tři a půl násobku hmotnosti samotného vzorku. Vzorky tak byly vystaveny tahu přibližně 3 kPa.



Obrázek 4: Tahově namáhané vzorky At během mrznutí.

Označení vzorku tedy sestává z jednotlivých lokalit A, B, S, dále u S rozlišení homogenních částí bloku Sa a Sb a dále i rozlišení, zda byly vzorky zvětrávány volně položené (bez indexu) nebo tahově namáhané (index t).

6 Výsledky experimentů

6.1 Volně postavené vzorky

Z průběhu pokusů vyplývá, že z testovaných vzorků je nejodolnější arkózový pískovec Sýkornických vodopádů, zejména šarže značená Sb. Slévárenský pískovec z Valdštejna se spolu se vzorky zóny Sa jeví jako středně odolný, nejméně odolnou horninou z testovaných materiálů je poloha červených rozhraničujících pískovců z lomu Střeleč.

Vzorek	A	B	At	Bt	Sa	Sb
Hustota suché horniny v g.cm ⁻³	1,78	1,80	1,81	1,80	2,14	2,09
Saturace po namočení (% hmotnosti suchého vzorku)	10,3%	9,7%	8,9%	9,3%	6,2%	5,9%
Nejvyšší saturace v průběhu testování (% hmotnosti suchého vzorku)	10,8%	11,1%	16,0%	16,6%	8,8%	7,6%
Průměrný úbytek po 10. cyklu	0,2%	29,5%	1,9%	x	+	+
Průměrný úbytek po 15. cyklu	5,2%	65,3%	x	x	+	1,4%
Průměrný úbytek po 20. cyklu	21,1%	82,2%	x	x	14,8%	1,5%
Průměrný úbytek po 25. cyklu	37,5%	92,4%	x	x	34,7%	3,2%
Čísla cyklů, ve kterých se vzorky rozpadly	30;35;37	29;29;34	12;13;14	7;9;12	28;-;-	-

Tabulka 1: Přehled průběhu pokusů. A - slévárenský pískovec z Valdštejna, B - červený rozhraničující pískovec, lom Střeleč, At, Bt - vzorky v tahovém namáhání, Sa, Sb – arkózy syřenovského souvrství, Sýkornice; + značí nárůst hmotnosti, x rozpad vzorků, - neznámé hodnoty.

Účinky mrazu na vzorky hornin z Valdštejna (A) a ze Sýkornice ze zóny Sa lze popsat společně, průběh jejich zvětrávání je kvantitativně i kvalitativně velmi podobný. Zpočátku působí poměrně odolně, úbytek hmotnosti byl u valdštejnského pískovce minimální a u arkózy hmotnost prvních deset až čtrnáct cyklů stoupá. Vzorky vydržely dlouho bez výrazného viditelného poškození, případně zvětrávaly spíše na skrytých vadách materiálu než úbytkem zrn na jejich povrchu; zde je patrné pouze mírné zaoblení hran. Okolo patnáctého cyklu se vzorky křemenného pískovce rozpadly na dvě části, poté následuje intenzivní zvětrávání na nově odkrytých plochách. Arkózy Sa

projevují náhlý pokles odolnosti mezi patnáctým a dvacátým cyklem. U obou hornin následuje rychlá degradace materiálu, úbytek zrn na povrchu i rozpad větších kusů najednou. Úplný rozpad posledního vzorku nastal u pískovce z Valdštejna během 37. cyklu (grafy jednotlivých vzorků viz příloha I a III).



Obrázek 5: Vzorky kvádového pískovce (A) během 12. cyklu, patrné jsou vznikající lokální poruchy.

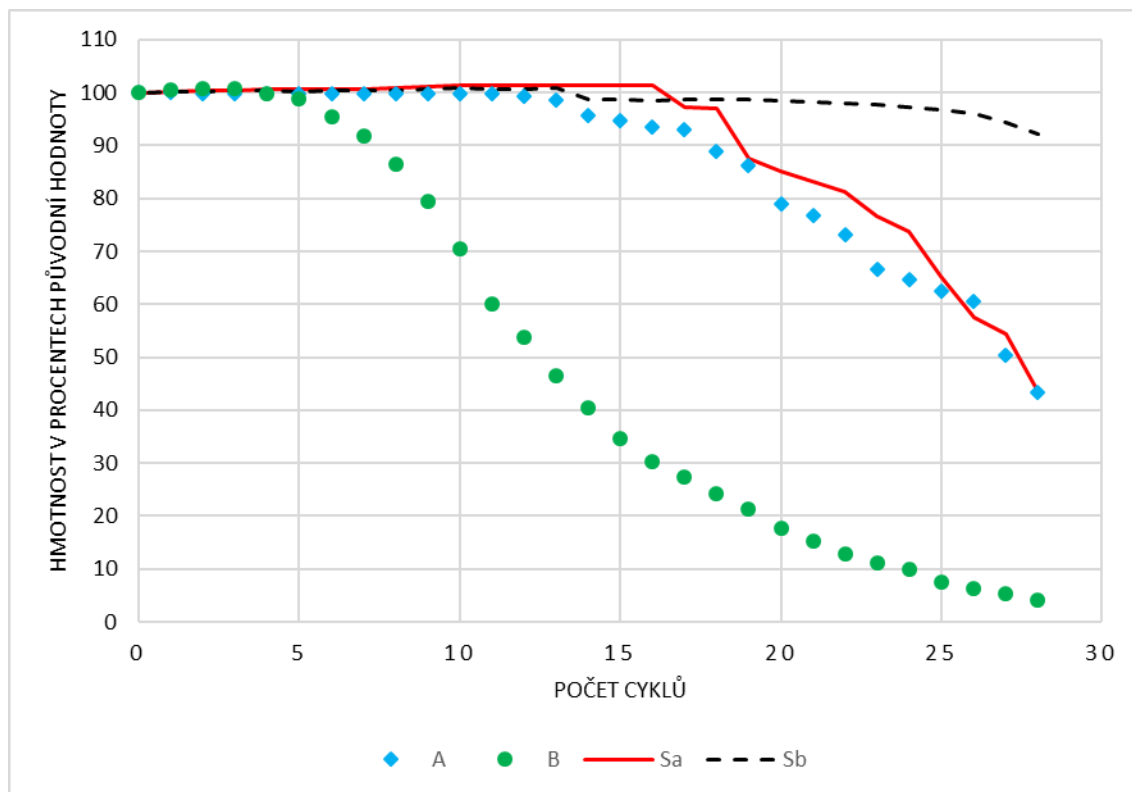
Pískovce červené rozhraničující polohy se podle očekávání projevují jako nejméně odolné. Již od pátého cyklu dochází k poměrně rychlému úbytku hmotnosti, ten má ale lineárnější a postupnější charakter než u předchozích hornin. Do jisté míry může být způsobený ztrátou jemnozrnných částí. Vzorky rychle ztrácí hrany, zaoblují se, poškození materiálu se projevuje spíše úbytkem zrn na povrchu vzorků, nedochází k rozpadu celých větších kusů. K úplnému zvětrání vzorků dochází okolo třicátého cyklu mrznutí a tání (příloha II).



Obrázek 6: Volné vzorky v průběhu testování, zleva: B (7. cyklus, A v pozadí), Sa, Sb (oba 14. cyklus).

Vzorky arkózy ze zóny označené Sb jsou ze zkoumaných pískovců nejodolnější. Prvních přibližně dvacet cyklů hmotnost spíše stoupá, poté začíná velmi pomalý úbytek.

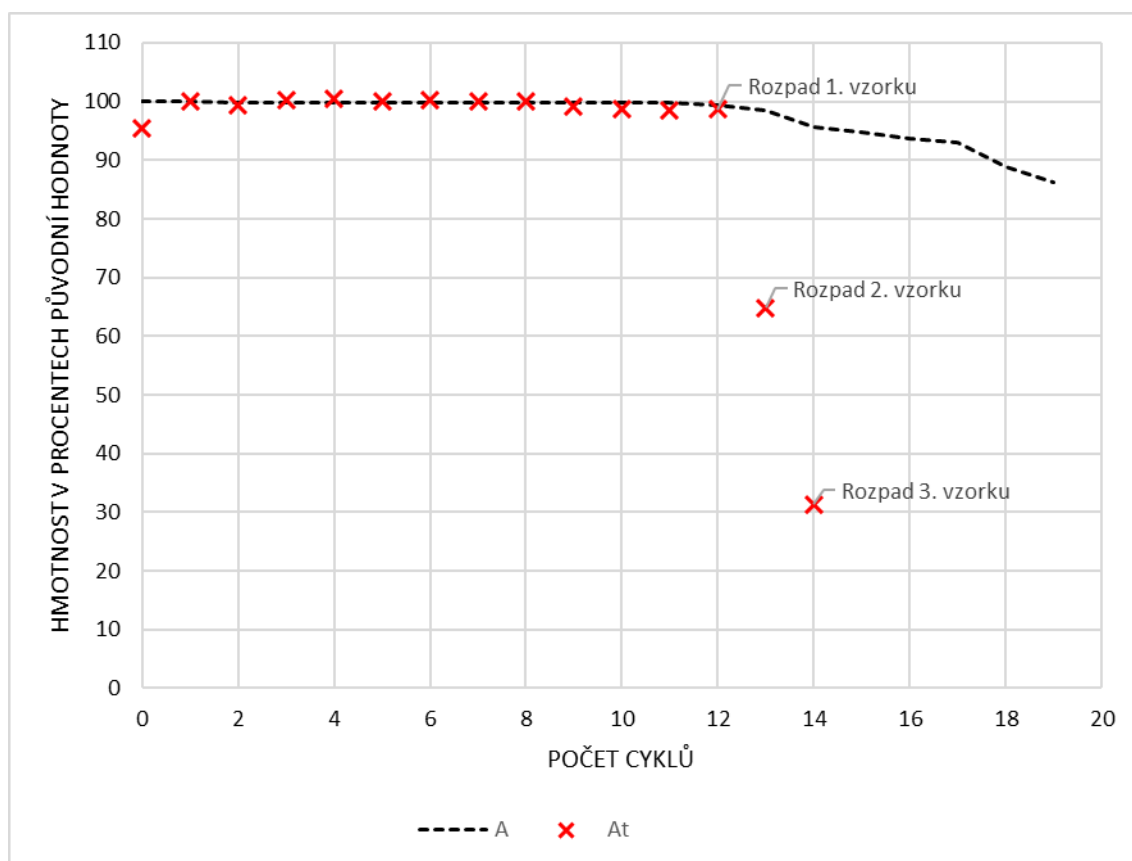
Výjimečně je makroskopicky patrné oslabení na puklinách či jiných vadách horniny, ale dezintegrace zrn z povrchu vzorku je minimální. V průběhu dalších cyklů chování Sb odpovídá vzorkům Sa, jen zvětřává v delším časovém horizontu. Průběh u jednotlivých vzorků lze srovnat v příloze IV.



Obrázek 7: Úbytek hmotnosti vzorků. A - slévárenský pískovec z Valdštejna, B - červený rozhraničující pískovec, lom Střeleč, Sa, Sb – arkózy syřenovského souvrství, Sýkornice

6.2 Vzorky testované v tahovém namáhání

Horniny testované v tahu, tzn. „slévárenský“ pískovec z Valdštejna (At) a pískovec červené rozhraničující polohy (Bt), vykazují oproti volně ponechaným vzorkům výrazně vyšší míru nasycení vodou. Po počátečním ponoření do vody jsou hodnoty srovnatelné, ale mezi třetím a čtvrtým cyklem mrznutí a tání dosahují nárůstu hmotnosti oproti suchým vzorkům až o 16,6 %, zatímco u stejných vzorků volně je tento nárůst okolo 11 %. To naznačuje počínající zvětřování materiálu na základě myšlenky Jia et al. (2015), že zbytková deformace a zvýšená porozita jsou jasnými známkami poškození.

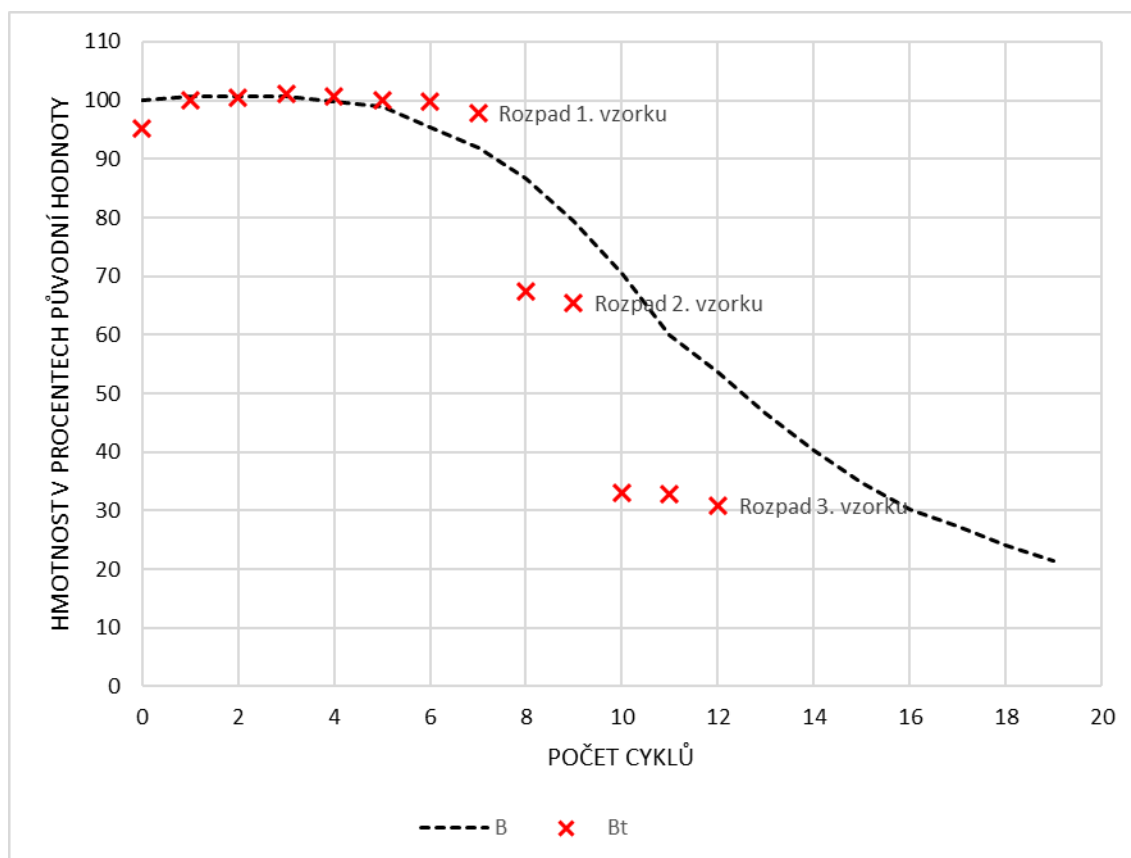


Obrázek 8: Úbytek hmotnosti vzorků, porovnání volně postaveného křemenného pískovce z Valdštejna (A) a jeho vzorků v tahovém namáhání (At).

Poté již následuje úbytek hmotnosti a pozorovatelné zvětřování, které má podobné projevy jako u volně položených vzorků stejných hornin, ale průběh je mírně rychlejší. Navíc u každého vzorku postupně dochází k rozpadu na dva kusy, a to již při velmi nízkém úbytku celkové hmotnosti. U červeného rozhraničujícího pískovce je to úbytek v průměru 8,2 %, u pískovce z Valdštejna průměrně 3,2 %, nejméně dokonce jen 1,6 % (grafy jednotlivých vzorků viz příloha V a VI). Rozpad znamená pro daný vzorek ukončení experimentu podmíněné odpadnutím závaží, tím se mění zkoumané parametry testování. K rozpadu dochází mezi dvanáctým až čtrnáctým cyklem u valdštejnského pískovce a mezi sedmým až dvanáctým u červeného rozhraničujícího. Celkově se výdrž tahem namáhaných vzorků zdá být přibližně třetinová oproti volně testovaným ekvivalentům, při ukončení testů zůstávají makroskopicky nezvětralé bloky o relativně vysoké hmotnosti. U nich však nelze pokračovat v daném způsobu testování.



Obrázek 9: Rozpad tahem namáhaných vzorků během 12. cyklu - tzn. rozpad prvního ze vzorků At a posledního z Bt.



Obrázek 10: Úbytek hmotnosti vzorků, porovnání volně postaveného pískovce červené rozhraničující polohy, lom Střeleč (B) a jeho vzorků v tahovém namáhání (Bt).

Pro všechny testované vzorky platí, že po zahájení pokusů během několika cyklů roste míra saturace vodou, u většiny vzorků se nárůst zastavuje do desátého cyklu, ale u arkózy zóny Sb pokračuje někdy i po dvacátém opakování mrznutí a tání. To by mohlo být způsobeno částečně postupným nahrazováním vzduchu v pórech vodou, ale pravděpodobně na tom má svůj podíl i zvýšení efektivní porozity zvětřovaných hornin zvětšováním pórového prostoru, či zvyšováním jeho prostupnosti pro kapalinu vyplachováním menších částic, rozpouštěním solí, popřípadě tmelu a změnami struktury horniny. Tato varianta odpovídá závěrům např. Jia et al. (2015) na základě jeho vlastních zvětřovacích pokusů. Možné změny porozity jsou naznačeny v tabulce 2. Jejich hodnoty jsou ovšem pouze ilustrativní, k určení sloužil výpočet na základě nárůstu hmotnosti a objemu vzorků. Navíc není známa skutečná míra nasycení pórů. Odlišné počáteční porozity vzorků A a At, resp. B a Bt, mohou být způsobeny také rozdílným množstvím vody zachycené na povrchu vzorků a závaží.

Vzorek	A	B	At	Bt	Sa	Sb
Porozita 1	18,3%	17,5%	16,1%	16,7%	13,3%	12,3%
Porozita 2	19,2%	20,0%	29,0%	29,9%	18,8%	15,9%
Nárůst	+0,9%	+2,5%	+12,9%	+13,1%	+5,6%	+3,6%

Tabulka 2: Teoretické efektivní porozity hornin po počátečním nasycení ve vodě (1) a jejich maximální hodnoty během testování (2). A - slévárenský pískovec z Valdštejna, B - červený rozhraničující pískovec, lom Střeleč, At, Bt - vzorky v tahovém namáhání, Sa, Sb – arkózy syřenovského souvrství, Sýkornice

Na základě provedených experimentů lze posoudit odolnost jednotlivých zkoumaných hornin, zatímco vzorky sýkornických arkóz (S) vykazují odolnost relativně vysokou, např. po dvaceti cyklech mrznutí a tání dochází u některých z nich (Sb) k úbytku hmotnosti pouze o přibližně 1,5 %, vzorky valdštejnského pískovce (A) za stejnou dobu ztratily průměrně 21 % hmotnosti a nejméně odolné vzorky pískovce tzv. červené rozhraničující polohy (B) dokonce přes 80 %. Rozdílný byl i průběh jejich zvětřování, zde se naopak vzorky B chovají lineárněji, hlavním mechanismem úbytku materiálu je postupná ztráta zrn z povrchu vzorků. Ostatní horniny naopak zvětřávají spíše oslabováním vzorků v místech již existujících poškození struktury či jejich výrazných rozhraní a následným rozpadem. Vzorky testované v tahu vykazovaly přibližně třetinovou trvanlivost oproti odpovídajícím volně položeným vzorkům testovaným volně a rozpad (ztráta tahového namáhání) nastal již při nízkém

hmotnostním úbytku (přibližně 6 %). Výsledky ukazují zásadní vliv i mírného tahového namáhání na odolnost pískovce vůči mrazovému zvětrání. Ten může souviset s vyšší mírou nasycení oproti ostatním vzorkům (6–10 %), maximální saturace vodou u tahem namáhaných vzorků dosahuje až 16,6 % hmotnosti suché horniny. Hodnoty jsou ovšem pouze přibližné, vzhledem k použitým metodám nelze spolehlivě určit změny pórovitosti, jejichž nárůstem je saturace ovlivněna. Zde je prostor pro případné další experimenty.

Míra skutečného poškození materiálu nemusí být patrná při pohledu zvenčí ani vážením úbytku vzorků, o čemž svědčí to, že během prvních cyklů se vzhled často mění jen minimálně, hmotnost roste, ale po určité době jsou části vzorků testovaných či srovnávacích mnohdy náchylné i na lehký dotek a reagují rozpadem celých částí vzorku. Manipulace s vnitřně zvětřalými vzorky je pak téměř nemožná.

7 Závěr

Z rešerše literatury vyplývá, že mrazové zvětrávání pískovců je vzhledem k jejich vlastnostem (vyšší porozita, struktura zrn) ovlivněno spíše mechanismy souvisejícími s migrací kapaliny prostorem pórů během mrznutí horniny, než tlaky vyvolanými objemovou expanzí ledu. Kromě parametrů materiálu je důležitý stupeň saturace vodou, cílová nejnižší teplota mrznutí a rychlost jejího dosažení. Vznik puklin je tím intenzivnější, čím nižší je rychlost poklesu teploty vzorku. Hlavními faktory, které určují vliv míry saturace horniny vodou na její pevnost, jsou především distribuce velikosti pórů a mineralogické složení matrix/tmelu, dále také jeho množství. Dobře propustné vzorky vodu snadno přijmou, ale i snadno uvolňují, náchylnější jsou horniny kombinující větší póry, kterými snadno proudí voda, s póry menšími, které ji zachycují a méně ochotně se jí zbavují. Vliv puklin a jiných poruch struktury často zvětrávání napomáhá, projevuje se zejména u hornin s nízkou propustností, kde jimi může proudit voda. Podstatné zesílení účinků mrazu představují v pórové vodě rozpuštěné soli, souběžná krystalizace ledu a solí umožňuje vznik mnohem vyšších tlaků působících na strukturu pískovce. V závislosti na podmínkách působení mrazu může být zvětrávání účinnější buď při opakovaných cyklech mrznutí a tání, nebo při dlouhodobém mrznutí při teplotách ještě umožňujících migraci vody, ale zároveň dostatečně nízkých pro vyvinutí tlaku, který způsobí rozrušování struktury (-4 až -20 °C). Výsledkem

zvětrávání je intergranulární rozpad povrchu pískovce, rozpadání podél diskontinuit nebo úplný rozklad horniny.

V rámci práce jsem provedl mrazové zvětrávací experimenty s kvádrovým pískovcem a jílovitým pískovcem z české křídly a s karbonskou arkózou. Vzorky byly vystaveny opakovaným cyklům mrznutí při teplotě - 20 °C a tání ve vodě za teploty 20 °C. Průběh a charakter zvětrávání byly sledovány měřením úbytku hmotnosti a popisem poškození. Vzorky byly testovány volně položené, část vzorků za působení tahového namáhání (3 kPa). Na základě experimentů jsem zjistil odolnost jednotlivých vzorků (od nejvyšší: arkóza – kvádrový pískovec – jílovitý pískovec) a rozlišil průběh zvětrávání (jílovitý pískovec – postupná ztráta zrn z povrchu; kvádrový pískovec a arkóza – rozpad na více částí, oslabování strukturních rozhraní, kolaps částí struktury). Vzorky testované v tahu dosahovaly ve srovnání s volně položenými vzorky přibližně třetinové trvanlivosti a již při nízkém hmotnostním úbytku u nich rozpadem vzorků na více částí došlo ke ztrátě tahového namáhání. Výsledky tak ukazují zásadní vliv i mírného tahového namáhání pískovce na jeho odolnost vůči mrazovému zvětrání.

Seznam použité literatury

- Bruthans, J., Světlík, D., Soukup, J., Schweigstillova, J., Válek, J., Sedláčková, M., Mayo, A. L., 2012. Fast evolving conduits in clay-bonded sandstone: Characterization, erosion processes and significance for the origin of sandstone landforms. *Geomorphology* 177–178, 178–193.
- Colón, C. F. J., Oelkers, E. H., Schott, J., 2004. Experimental investigation of the effect of dissolution on sandstone permeability, porosity, and reactive surface area. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 805-817.
- Čech S., Smutek, D., 2013. Nové poznatky o geologii a hydrogeologii lomu Střeleč. *SOVAK* 22/4, 8-12.
- Everett, D. H., 1961. The thermodynamics of frost damage to porous solids. *Faraday Society Transactions* 57, 1541-1551.
- Fitzner, B., Snethlage, R., 1982. Einfluß der Porenradienverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine. *Bautenschutz und Bausanierung* 5, 97-103.
- Geologická mapa 1:25 000 © 2014 Česká Geologická Služba. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_25/ (25.8.2016).
- Hall, K., Verbeek, A., Meiklejohn, I., 1986. A method for the extraction and analysis of solutes from rock samples with some comments on the implications for weathering studies: an example from Signy Island, Antarctica. *BAS Bulletin* 70, 79-84.
- Hall, K., 1988. A laboratory simulation of rock breakdown due to freeze-thaw in a maritime Antarctic environment. *Earth Surface Processes and Landforms* 13, 369-382.
- Hallet, B., 1983. The breakdown of rock due to freezing: a theoretical model. *International Conference on Permafrost, proceedings* 4, 433-438.
- Hirschwald, J., 1908. Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.

- Hodder, A. P. W., 1976. Cavitation-induced nucleation of ice: a possible mechanism for frost-cracking in rocks. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 19, 821-826.
- Jia, H., Xiang, W., Krautblatter, M., 2015. Quantifying rock fatigue and decreasing compressive and tensile strength after repeated freeze-thaw cycles. *Permafrost and Periglacial Processes* 26, 368-377.
- La Plaza, S., Post, B., 1960., Thermal expansion of ice. *Acta Crystallographica* 13, 503-505.
- Labus, M., Bochen, J., 2012. Sandstone degradation: an experimental study of accelerated weathering. *Environmental Earth Sciences* 67, 2027-2042.
- Matsuoka, N., Murton, J., 2008. Frost weathering: recent advances and future directions. *Permafrost and Periglacial Processes* 19, 195-210.
- Morales Demarco, M., Jahns, E., Rüdrieh, J., Oyhantcabal, P., Siegesmund, S., 2007. The impact of partial water saturation on rock strength: an experimental study on sandstone. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 158/4, 869-882.
- Nicholson, D. T., Nicholson, F. H., 2000. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 1295-1307.
- Pešek, J. (ed.), 2001. *Geologie a ložiska svrchnopaleozoických limnických pánví České republiky*. Český geologický ústav, Praha.
- Ruedrich, J., Kirchner, D., Siegesmund, S., 2010. Physical weathering of building stones induced by freeze-thaw action: a laboratory long-term study. *Environmental Earth Sciences* 63, 1573-1586.
- Ruedrich, J., Siegesmund, S., 2006. Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environmental Geology* 52, 225–249.
- Saad, A., Guédon, S., Martineau, F., 2010. Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze–thaw cycles: experimental study of state and transfer parameters. *Comptes Rendus Geoscience* 342, 197-203.
- Scherer, G. W., 1999. Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research* 29, 1347-1358.

- Siegesmund, S., Friedel C.-H., Vogel, J., Mosch, S., Naumann, D., Peter, A., Giesen, H., 2010. Stability assessment of sandstones from the St. Servatius Church in Quedlinburg (UNESCO's World Heritage Site, Germany). *Environmental Earth Sciences* 63, 641-659.
- Steiger, M., 2005. Crystal growth in porous materials I: the crystallization pressure of large crystals. *Journal of Crystal Growth* 282, 455-469.
- Stockhausen, N., 1981. Die Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme und Eisbildung. PhD TU, München, p. 163.
- Taber, S., 1930. The mechanics of frost heaving. In: Black, P. B., Hardenberg, M. J. (Eds.), *Historical perspectives in frost heave research: the early works of S. Taber and G. Beskow*. US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, pp. 27-35.
- Takashi, T., Ohrai, T., Yamamoto, H., Okamoto J., 1981. Upper limit of heaving pressure derived by pore-water pressure measurements of partially frozen soil. *Engineering Geology* 18, 245-257.
- Uličný, D., 2001. Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip setting: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Sedimentology* 48, 599–628.
- Walder, J., Hallet, B., 1985. A theoretical model of the fracture of rock during freezing. *Geological Society of America Bulletin* 96, 336-346.
- Walder, J., Hallet, B., 1986. The physical basis of frost weathering: toward a more fundamental and unified perspective. *Arctic and Alpine Research* 18, 27-32.
- Williams, R. B. G., Robinson, D. A., 1981. Weathering of sandstone by the combined action of frost and salt. *Earth Surface Processes and Landforms* 6, 1-9.
- Winkler, E. M., 1968. Frost damage to stone and concrete: geological considerations. *Engineering Geology* 2, 315-323.
- Winkler, E. M., 1975. *Stone: properties, durability in man's environment*. Springer, New York

Seznam použitého obrazového materiálu

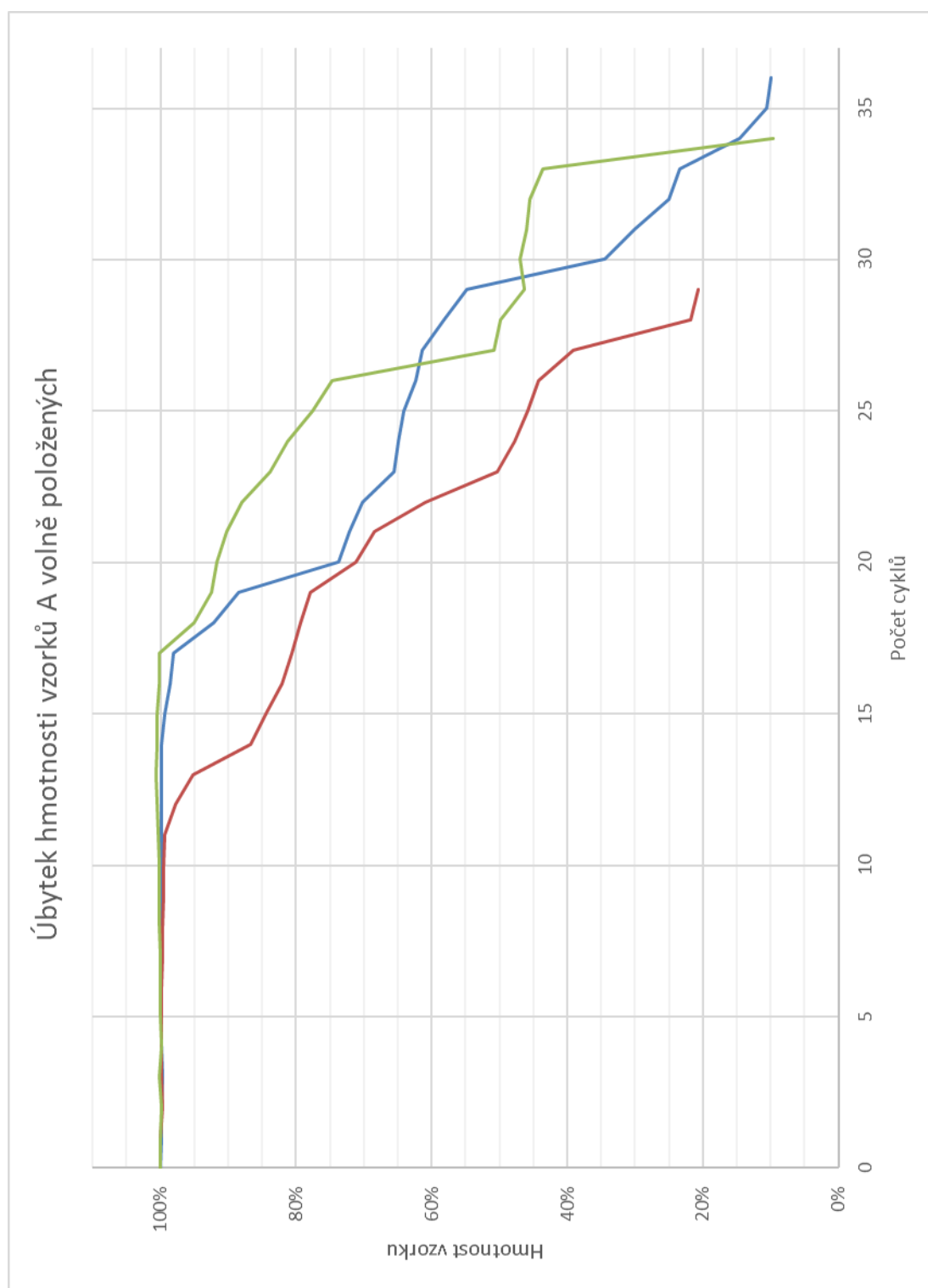
Fázový diagram (online). Dostupné

z: http://www.dmc.fmph.uniba.sk/public_html/pub/lectures/ex.htm (25.8.2016).

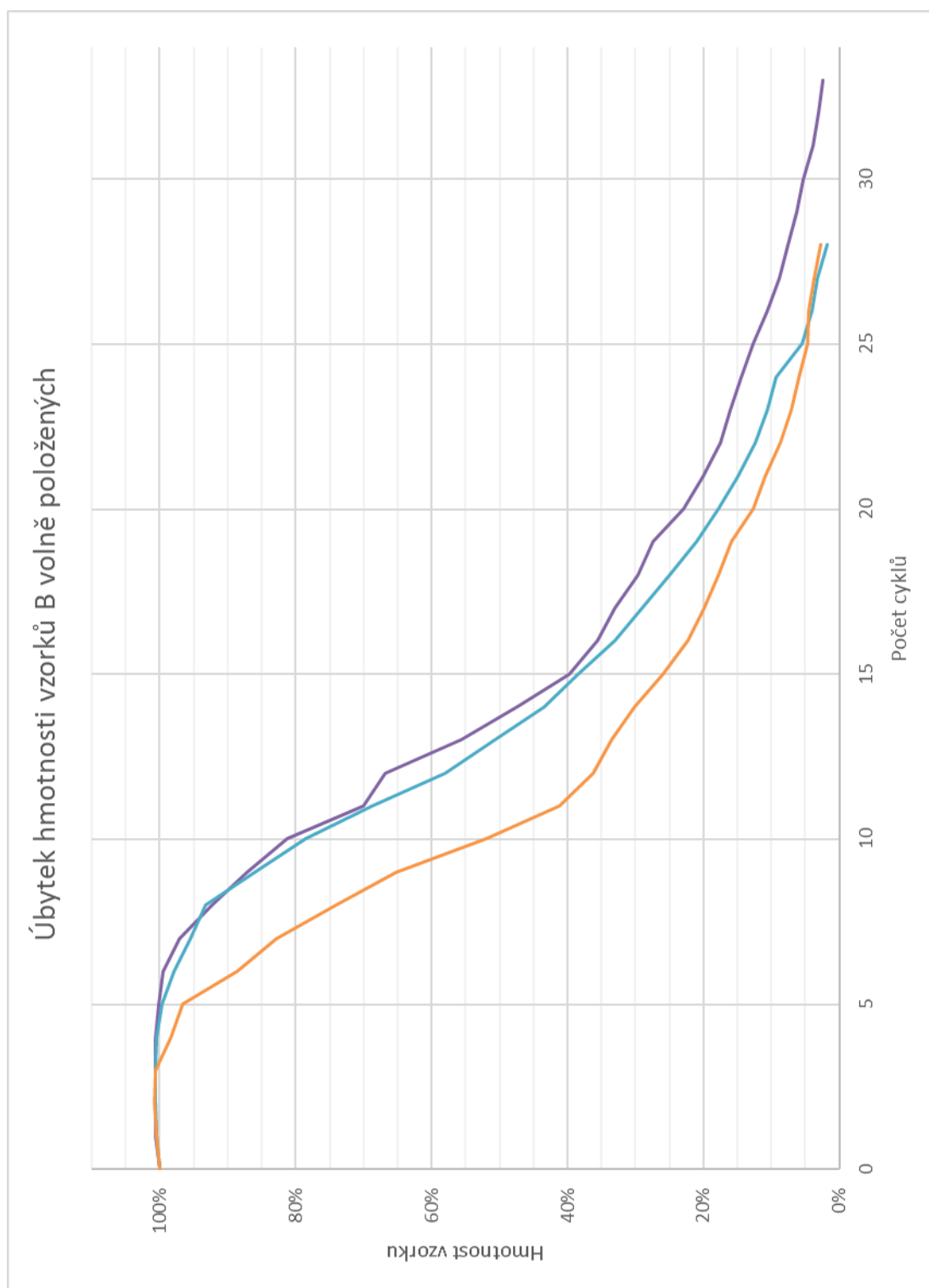
Čech S., Smutek, D., 2013. Schematický litologický profil jámovým lomem Střeleč.

In: Nové poznatky o geologii a hydrogeologii lomu Střeleč. SOVAK 22/4, p. 8.

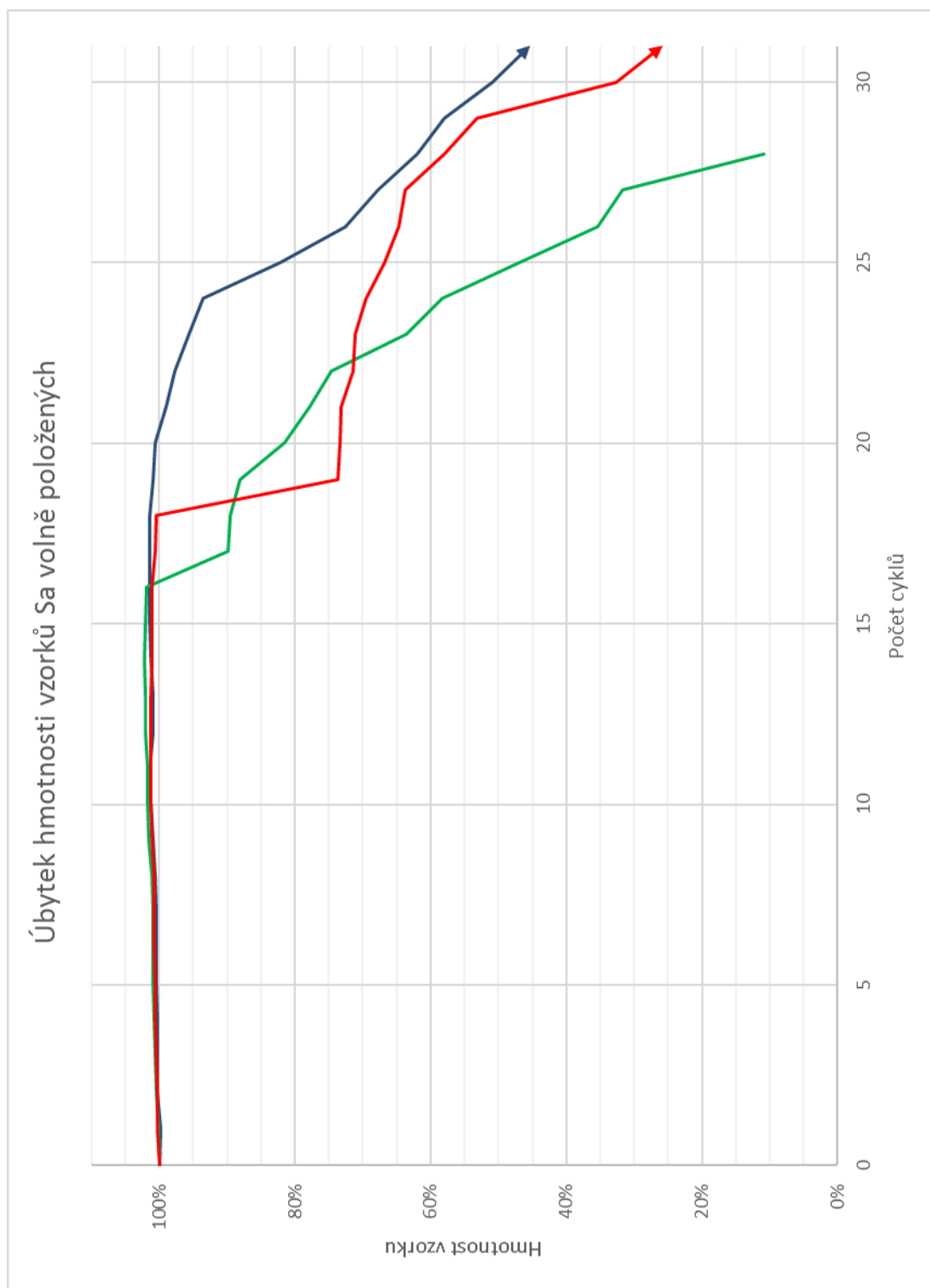
Příloha I: Graf úbytku hmotnosti jednotlivých vzorků A



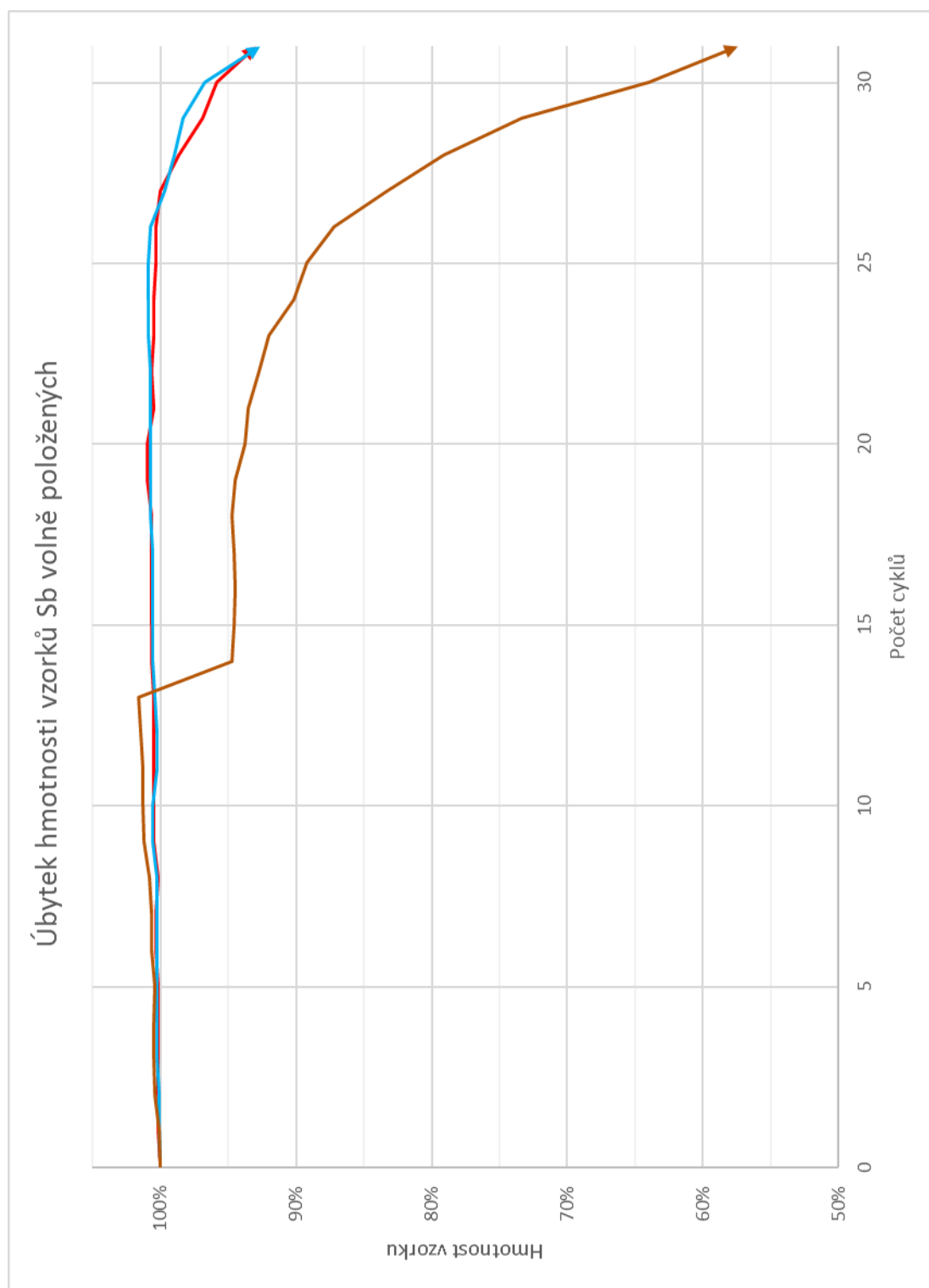
Příloha II: Graf úbytku hmotnosti jednotlivých vzorků B



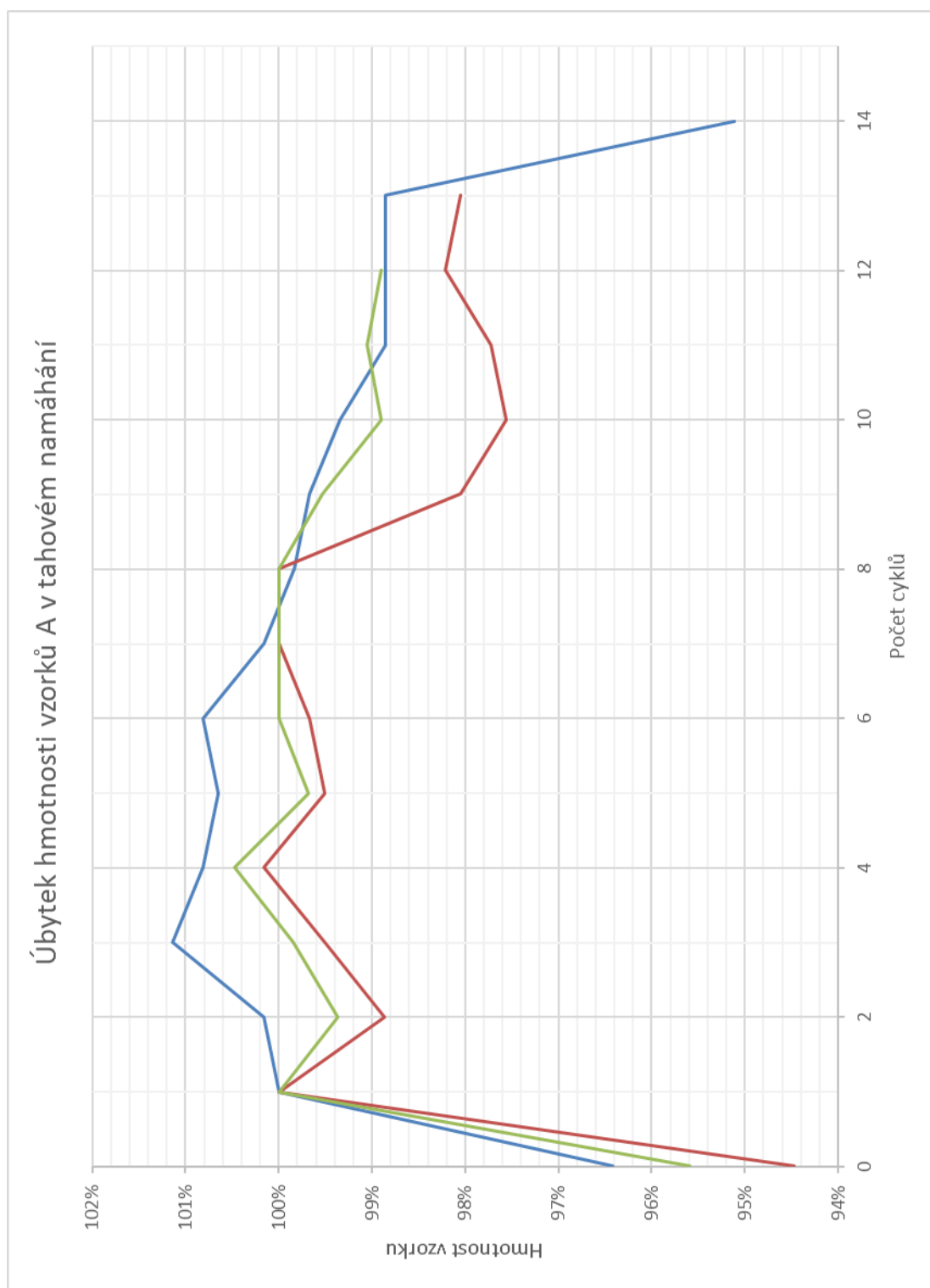
Příloha III: Graf úbytku hmotnosti jednotlivých vzorků Sa



Příloha IV: Graf úbytku hmotnosti jednotlivých vzorků Sb



Příloha V: Graf úbytku hmotnosti jednotlivých vzorků At



Příloha VI: Graf úbytku hmotnosti jednotlivých vzorků Bt

